

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20180419001

http://www.yykxjz.cn/

蔡碧莹, 朱长波, 刘慧, 常丽荣, 肖露阳, 孙倩雯, 蔺凡. 桑沟湾养殖海带生长的模型预测. 渔业科学进展, 2019, 40(3): 31-41

Cai BY, Zhu CB, Liu H, Chang LR, Xiao LY, Sun QW, Lin F. Model simulated growth of the kelp *Saccharina japonica* in Sanggou Bay. Progress in Fishery Sciences, 2019, 40(3): 31-41

桑沟湾养殖海带生长的模型预测*

蔡碧莹^{1,2,3} 朱长波⁴ 刘慧^{2,3①} 常丽荣⁵
肖露阳⁵ 孙倩雯^{1,2,3} 蔺凡^{2,3}

- (1. 上海海洋大学水产与生命学院 上海 201306; 2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所 青岛 266071;
3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室 青岛 266071;
4. 中国水产科学研究院南海水产研究所 广州 510300; 5. 威海长青海洋科技股份有限公司 荣成 264316)

摘要 海带(*Saccharina japonica*)是一种常见的大型经济褐藻,是海洋生态系统重要的初级生产者,也是我国北方沿海主要的养殖藻类。本研究旨在建立海带个体生长数值模型,并以此预测中国北方近海大规模筏式养殖条件下海带的生长情况。本研究以桑沟湾养殖海带为例,利用可视化模型软件 STELLA 描述海带生长的关键过程及其与环境参数的关系,以净生长量(N_{growth})=总生长量(G_{growth})-呼吸作用(resp)-枯烂(E_{kelp})为基本框架,模拟和预测海带的生物量和叶片长度变化。海带的总生长用光照、温度、盐度、海带体内营养盐(包括 N 和 P)等强制函数定义,其中,光照参数来自桑沟湾气象记录,盐度、温度和营养盐为现场调查实测值。模型模拟桑沟湾养殖海带的长度与干重结果与实测值的拟合度 R^2 值分别为 0.936、0.963,说明该模型能够很好反映海带的真实生长情况。可靠的个体生长模型是评估海带养殖容量的基础,并可为水产养殖区的空间规划提供决策依据。

关键词 桑沟湾; 海带; 个体生长模型; 环境条件; STELLA

中图分类号 S968.4 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2019)03-0031-11

桑沟湾的海带(*Saccharina japonica*)养殖始于1957年,产量逐年增加,目前已逾10万t(张为先,1992)。海带养殖产量与海带的长度和重量有关,生长状况较好的海带,长度、宽度和厚度都较大,出成率比较高。近年来,桑沟湾筏式养殖的海带在养殖后期(一般是4月下旬以后),叶片有明显的枯烂现象,并随时间推移愈加严重,在一定程度上影响了海带养殖产量和效益。Li等(2007)研究表明,海带叶片末梢枯烂的现象从11月放苗开始出现,并持续整个养殖

周期。Suzuki等(2008)发现,当温度超过17.5℃,海带叶片末梢的枯烂率就已超过其生长率。同时,温度、光照和营养盐的变化都可能引起海带叶片末梢枯烂。

在过去的几十年里,国内外开发了一些用于模拟海藻生长的模型,一方面用于预测海带和石莼(*Ulva rigida*)等藻类的生长(Zhang *et al.*, 2016; Solidoro *et al.*, 1997),另一方面也用于绿藻和蓝藻等灾害藻类暴发的预警(Martins *et al.*, 2002; 汪浩等, 2012)。为了更好地模拟环境因素对海带生长的影响,本研究在桑沟湾

* 科技部国际创新合作专项“基于生态系统的水产养殖空间规划研究”(2016YFE0112600)和欧盟地平线 2020 项目 AquaSpace (633476-H2020-SFS-2014-2015)共同资助 [This research is supported by the Key Programme for International Cooperation on Scientific and Technological Innovation, Ministry of Science and Technology (2016YFE0112600) and EU Horizon 2020 Programme AquaSpace (633476-H2020-SFS-2014-2015)]. 蔡碧莹, E-mail: woshicaibiyang@126.com

① 通讯作者: 刘慧, 研究员, E-mail: liuhui@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2018-04-19, 收修改稿日期: 2018-04-28

的3个不同区域设置了采样站位,进行海带采样与环境监测。通过分析海带生长的主要限制因素,将其参数化,以动态能量学(Dynamic Energy Budget, DEB)理论为指导(Marianne *et al*, 2009),建立了基于桑沟湾的海带个体生长模型。通过模型运算可以有效预测不同的环境条件下,海带的生长状况和产量变化,为今后海区养殖容量的估算及养殖管理提供理论和技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究海域

桑沟湾(37°01'~37°09'N, 122°24'~122°35'E)位于山东半岛东部沿海,是我国北方主要的浅海养殖水域之一,为半封闭海湾,呈“C”状。湾口南北宽 11.5 km,东西宽 7.5 km,海岸线长 90 km,面积为 144 km²。温度范围 2℃~26℃,年平均水温为 13℃;湾内盐度变化不大,平均盐度为 31.76;日光照射时数平均为 208.4 h,年平均降雨 800 mm(国家海洋局一所,1988)。

实验在桑沟湾高区(High Zone, HZ)、中区(Medium Zone, MZ)、低区(Low Zone, LZ)设置了3个采样站,高区: 37°8'33.47"N, 122°37'59.22"E; 中区: 37°8'37.44"N, 122°36'30.98"E; 低区: 37°09'52.88"N, 122°35'10.06"E。其中,高区水深 23.4 m,流速较大,为 0.3 m/s 左右;中区水深 20 m,流速较为适宜,为 0.25 m/s 左右;低区水深 16.7 m,流速较小,为 0.1 m/s 左右。所有采样站位均用 GPS 进行准确定位(图 1)。桑沟湾筏式养殖海带采用间隔平养,养殖期为 11 月中旬到次年 7 月中旬。

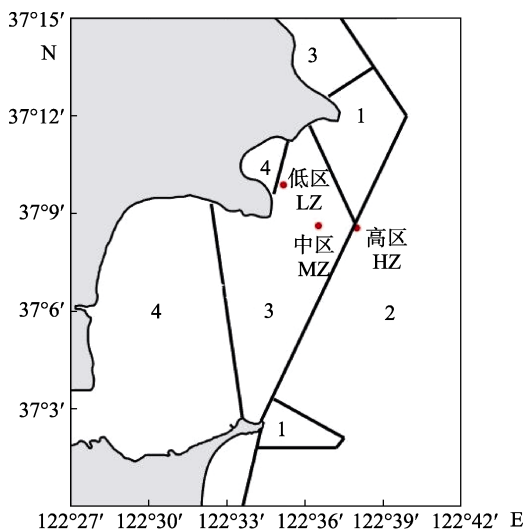


图 1 桑沟湾海域采样点

Fig.1 The sampling points of Sanggou Bay

1.2 桑沟湾海域环境及海带生长参数

海带个体生长模型的概念流程如图 2 所示。实验对桑沟湾海带 2016 年 11 月至 2017 年 6 月的生长情况和环境条件进行监测。环境监测项目包括水体表面温度 T (℃)、水体盐度 S 、营养盐 N 和 P 浓度($\mu\text{mol/L}$)、环境光照 I ($\mu\text{mol/m}^2 \cdot \text{s}$)以及颗粒有机物浓度 TPM (mg/L),每 30 d 左右监测 1 次。环境参数按照《海洋调查规范》要求采样,海水中营养盐、 TPM 的分析均按照《海洋监测规范》(GB 17378-2007)进行。海带生长情况监测项目包括干重 DW (g)和长度 Length (cm),每 30 d 左右监测 1 次,每次测量 5 个个体。

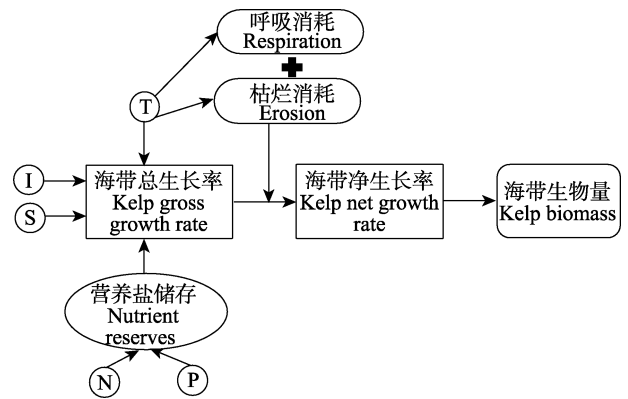


图 2 海带生长模型概念流程

Fig.2 Conceptual diagram of the kelp growth model

注:强制函数包括 T (温度)、 I (光照)、 S (盐度)、 N (溶解性无机氮包括: NH_4^+-N 、 NO_3^--N)、 P (溶解性无机磷: $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$)
Note: The forcing functions include T (temperature), I (light), S (salinity), N (dissolved inorganic nitrogen including: NH_4^+-N and NO_3^--N), P (dissolved inorganic phosphorus: $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$)

1.3 模型函数

海带的净生长量(N_{growth})由其总生长量(G_{growth})与呼吸作用(resp)和海带枯烂(E_{kelp})之差决定:

$$N_{\text{growth}} = G_{\text{growth}} - \text{resp} - E_{\text{kelp}}$$

式中,呼吸作用(resp)主要采用 Jørgensen 等(2008)关于计算呼吸作用的公式:

$$\text{resp} = R_{\text{max}20^\circ\text{C}} \times \theta^{T-20}$$

式中, $R_{\text{max}20^\circ\text{C}}$ 为 20℃ 最大呼吸速率, θ 为经验系数经模型校正取 1.02。

G_{growth} 受海带最大生长率(μ_{max})、温度(T)的变动、光照的限制(I)、盐度限制(S)及营养物的限制(N 、 P)共同作用。利用相乘限制方法,即:

$$G_{\text{growth}} = m_{\text{max}} \times f(T) \times f(I) \times f(S) \times f(NP)$$

海带的生长遵循在最适温度附近的偏正态分布, 所以采用如下温度函数(Radach *et al*, 1993):

$$f(T) = \exp\left[-2.3 \times \left(\frac{T - T_{\text{opt}}}{T_x - T_{\text{opt}}}\right)^2\right]$$

式中, T_{opt} 和 T_x 分别代表海带生长的最适温度和温度生态幅; 当 $T \leq T_{\text{opt}}$ 时, $T_x = T_{\text{min}}$ (温度生态幅下限); 当 $T > T_{\text{opt}}$ 时, $T_x = T_{\text{max}}$ (温度生态幅上限)。

海带在高强度的光强下光合作用受到抑制, 生长处于抑制状态(张起信, 1994)。因此, 光照函数采用 Steele 公式光抑制模型最优曲线(Steele *et al*, 1962):

$$f(I) = \frac{I}{I_{\text{opt}}} \times e^{\left(1 - \frac{I}{I_{\text{opt}}}\right)}$$

式中, I_{opt} 为光合作用最适光强, I 为到达海带表面的光照强度。

潮位的变化会引起光照水深的变化。由于海带为筏式养殖生物, 浮筏本身会随着潮水升降, 所以潮位的变化并不会引起养殖生物水层的变化, 海带基本保持固定的生长水层不变。同时, 由于水流的存在, 海带基本上是漂浮在水的上层。在深度(Z)光照(I)的变化, 用 Beer 公式(Parsons *et al*, 1990)表示:

$$I = I_0 \times \exp(-k \times Z)$$

式中, I_0 为水表面的光强, k 为吸光系数, Z 为水层深度。

养殖海区水体的初级生产力也取决于水中的吸光系数 k 。潮位的变化所引起的涨潮、退潮以及风浪流, 都能对水体和海床造成扰动。这种变化引起的海底沉积物的再悬浮是引起 k 变化的主要因素。Suzuki 等(2008)在桑沟湾研究得出 TPM 与 k 之间的关系, 建立经验公式如下:

$$k = 0.0484 \times \text{TPM} + 0.0243$$

公式描述了 k 与 TPM 之间的关系, 利用不同时刻的 TPM 测值输入模型, 进一步反映 Z 深度下的光照变化情况。

光照强制函数的输入, 不能以某一天的某一时刻光照作为变量输入, 应参考养殖海区的当日平均光照情况, 同时需要考虑每月的晴日天、阴雨雪天、当月的日照时长等。根据中国气象局对荣成市 2016~2017 年的天气预报, 计算了每月晴日天及阴雨天数、每月的日照时长; 并且根据实测的桑沟湾海域晴日天及阴雨天气光照强度, 一天平均海表面光照强度分别为 550、385 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 。

平均海表面光照强度公式:

$$I_0 = \frac{\text{日照时长} \times (\text{晴日天} \times 550 + \text{阴雨天} \times 385)}{\text{总天数} \times 24}$$

针对桑沟湾盐度变化情况, 参照 Martins 等(2002)浒苔模型中对盐度限制的表达式:

$$f(S) = 1 - \left(\frac{S - S_{\text{opt}}}{S_x - S_{\text{opt}}}\right)^m$$

式中, S_{opt} 为最适生长盐度, 当 $S < S_{\text{opt}}$, $S_x = S_{\text{min}}$ (停止生长的盐度耐受的最小值), $m = 2.5$; $S \geq S_{\text{opt}}$, $S_x = S_{\text{max}}$ (停止生长的盐度耐受的最大值), $m = 2$ 。

海带生长受相对最缺乏的营养盐限制, 海带体内氮磷比(N/P)是 12~16 时, 营养盐最易被海带吸收。因此, $N/P < 12$, $f(NP) = f(N)$; $12 \leq N/P \leq 16$, $f(NP) = 1$; $N/P > 16$, $f(NP) = f(P)$ (Martins *et al*, 2002)。

海带对 N 营养盐的吸收特征符合饱和吸收动力学。同时, 因为藻类的生长取决于细胞内浓度, 而不是水体中的浓度, 根据 Michaelis-Menten ($N_{\text{int}} - N_{\text{imin}}$) 米氏方程计算:

$$f(N) = \frac{N_{\text{int}} - N_{\text{imin}}}{K_q + N_{\text{int}} - N_{\text{imin}}}$$

式中, N_{int} 和 N_{imin} 分别是海带体内游离 N 含量、海带体内游离 N 的最低需求, K_q 为 N 的半饱和同化系数。

海带对 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的吸收动力学特征不符合米氏方程, 藻体的生长随体内 P 的增加呈线性增加(Jørgensen 等, 2008)。

如 $P_{\text{int}} < P_{\text{imax}}$, $f(P) = \frac{P_{\text{int}}}{P_{\text{imax}}}$; 如果 $P_{\text{int}} \geq P_{\text{imax}}$, $f(P) = 1$

式中, P_{int} 和 P_{imax} 分别是海带体内游离 P、维持最大生长率所需的体内游离 P 含量。

海带体内游离 N、P 营养盐含量(N_{int} , P_{int})的计算是将吸收的营养盐(φ)减去同化为组织的营养盐(γ)得到。

$$\varphi = \frac{X_{\text{imax}} - X_{\text{int}}}{X_{\text{imax}} - X_{\text{imin}}} \times \frac{V_{\text{max}} \times X_{\text{ext}}}{K_x + X_{\text{ext}}}$$

$$\gamma = X_{\text{int}} \times G_{\text{growth}}$$

式中, X 代表 N 或 P; V_{max} 为 N 或 P 营养盐的最大吸收速率; K_x 为 N 或 P 营养盐吸收的半饱和常数; X_{ext} 为海水中无机 N 或 P 营养盐含量。

海带存在由于光照过强引起的白烂病, 光照过弱引起的绿烂病等病理性枯烂, 这类枯烂可根据光照情况及时调节养殖水层得到改善。除了海带病理性枯烂, 海带叶片末梢枯烂也是一种遗传特性, 当温度或其他环境条件改变, 海带末梢开始枯烂, 并通过枯烂组织的营养盐循环, 促进海带分生组织的生长, 有利于孢子的放散, 属于一种生存机制(Li *et al*, 2007)。在 4 月以前, 海带末梢枯烂并不明显, 之后随着海水温

度的不断升高,末梢枯烂率大幅度上升,5月枯烂率达到最大,以后保持平稳状态(Li *et al.*, 2007; Mizuta *et al.*, 2003)。综上所述,根据海带的最佳温度(T_{opt})与海水中的温度(T)之间的差值作为指数,得出海带枯烂的方程:

$$E_{kelp} = E_{max} \times P^{(T-T_{opt})}$$

式中, T_{opt} 为海带最佳生长温度, T 为不同时刻的温度测量值, P 为经验系数经模型校正,取 1.05, E_{max} 为海带最大枯烂率。

吴荣军等(2009)对于海带长度与干重得到的经典公式,可能是存在海带干湿比不同等因素,与作者的海带长度与干重实测值有一定差异。本研究通过 Origin 9.0 软件对吴荣军海带长度与干重经典公式进行系数校准,得出海带长度与干重经典公式为:

$$L = \exp\left[\ln(DW \times 10^{6.28}) / 3.35\right]$$

式中, L 为海带长度, DW 为海带干重。

1.4 状态变量及强制函数

模型中的 3 个状态变量包括海带体内营养盐含量(N_{int} , P_{int} , $\mu\text{mol/g}$)、海带的干重(DW , g)、 $N_{int}(t)$ 、 $P_{int}(t)$ 、 $DW(t)$:

$$\begin{aligned} N_{int}(t) &= N_{int}(t-dt) + \varphi_N - \gamma_N \\ P_{int}(t) &= P_{int}(t-dt) + \varphi_P - \gamma_P \\ DW(t) &= DW(t-dt) + N_{growth} \end{aligned}$$

模型中状态变量的初始值 N_{int} 和 P_{int} 的取值,采用海带组织氮 TN 含量及组织磷 TP 含量以海带干重的百分比(% DW)表示(王文雷等, 2009)。Zhang 等(2016)测定 1 月海带 TN 为 1.51%, 经过单位换算为 $N_{int}=1071 \mu\text{mol/g}$ 。刘嘉伟等(2017)测定海带 TP 为 0.218%, 经过单位换算为 $P_{int}=70.32 \mu\text{mol/g}$ 。

强制函数(Forcing functions)也称为外部变量,它是影响生态系统状态的外部变量或函数。模型可以用来预测强制函数随时间变化时,生态系统的状态将产生何种变化和影响。水温 $T(^{\circ}\text{C})$ 、光照 $I(\mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s})$ 、水体 N 含量 $N_{ext}(\mu\text{mol/L})$ (包括 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$)、水体中的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量 $P_{ext}(\mu\text{mol/L})$ 、水体中颗粒物浓度 $\text{TPM}(\text{mg/L})$ 为模型的强制函数,根据不同时刻的实测值输入。

1.5 模型中的参数

模型总共包含 22 个常变量(表 1),与营养盐吸收消耗相关参数为 11 个,海带生长消耗相关参数 3 个,海带生长环境相关参数 8 个。模型中大部分重要参数来自桑沟湾海区实验研究结果及相关文献。

海带孢子体适温范围很广,最适温为 5~10 $^{\circ}\text{C}$,结合养殖生产实际,适温范围约在 12~13 $^{\circ}\text{C}$ 左右(张为先等, 1992; 曾呈奎等, 1994),模型选择海带生长最佳温度 T_{opt} 为 12 $^{\circ}\text{C}$, T_{min} 为 0.5 $^{\circ}\text{C}$, T_{max} 为 20 $^{\circ}\text{C}$ 。

季仲强(2011)研究不同盐度下海带对 N、P 营养盐的吸收效率表明,盐度为 3 时, P 的吸收出现了负吸收现象。陈根禄(1958)提出,盐度为 29~32 最适宜海带生长。因此,设 S_{min} 为 3,盐度上限 S_{max} 为 40,最适盐度 S_{opt} 设为 30。张起信(1995)设定的 I_{opt} 范围为 252~396 $\mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$, Duarte 等(2003)对于 I_{opt} 的设定值为 491.4 $\mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$,模型设定 I_{opt} 为 350 $\mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$ 。

根据沈淑芬(2013)对海带 N、P 营养盐吸收动力学特征的研究,选取 $V_{max\text{NO}_3}$ 、 $V_{max\text{NH}_4}$ 、 $V_{max\text{PO}_4}$ 分别为 10.28、52.63、8.58 $\mu\text{mol/g}\cdot\text{h}$,经单位换算分别为 246.72、1263.12、205.92 $\mu\text{mol/g}\cdot\text{d}$,对应的 K_{NO_3} 、 K_{NH_4} 、 K_{PO_4} 分别为 29.02、169.49、6.01 $\mu\text{mol/L}$ 。N 含量为干重的 2.4%, 1.3% 分别为 N_{imax} 和 N_{imin} ,经单位换算及模型率定设为 1714 $\mu\text{molN/gDW}$ 和 300 $\mu\text{molN/gDW}$ (Mizuta *et al.*, 1992)。 P_{imax} 和 P_{imin} 选取 171 $\mu\text{molP/gDW}$ 和 30 $\mu\text{molP/gDW}$ (Mizuta *et al.*, 2003)。 K_q 和 $R_{max20^{\circ}\text{C}}$ 参数值取自 EPA(1985)并进行模型校正。

海带一般是漂浮在水中,1月开始加入浮球,提升海带的养殖水层,使海带分生组织基本保持在 50 cm 左右水层,因此,选择 Z 为 0.5 m。

姚海芹(2016)测量海带平均日生长速率范围在 (0.15~0.75)/d 之间,根据文献及模型调试选取 0.6/d 为海带的最大生长率。针对海带枯烂率研究表明,海带在整个养殖周期,枯烂的长度约为 196 cm, 2.0 cm/d 为海带最大枯烂率(Mizuta *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2007),枯烂鲜重为(4.0 \pm 0.9) gwt/d (Suzuki *et al.*, 2008),结合此时海带的鲜重,换算成百分比约为 0.006/d,假定同一海带各部分的干湿比一致,选择 0.006 为 E_{max} ,海带生长模型中相应参数与取值见表 1。

1.6 模型构建及运行

在海带生长的生理生化过程分析的基础上,利用可视化模型软件 Stella Architect 1.4.3 构建上述的公式及参数,基于 Stella 软件构建出海带生长模型流程图(图 3)。其中,模型设置包括时间步长为 0.04 d,根据海带养成时间设置模拟时长为 220 d。以海带苗的放苗时间为准,低区 11 月 15 日,中区 11 月 24 日,高区 12 月 7 日,高、中、低区分别设定不同的模型运算开始时间。高、中、低区海带干重(DW)的初始值分别为 0.5 g、0.45 g、0.25 g。

表 1 海带生长模型中的参数与取值
Tab.1 Parameters of growth model of kelp (*Saccharina japonica*)

参数 Parameter	定义 Description	单位 Units	参数值 Value	参考文献 Reference
μ_{\max}	适宜温度下最大生长速率 Maximum growth rate at T_{opt}	d^{-1}	0.6	姚海芹等(2016)
I_{opt}	光合作用的最适光强 Optimum light intensity for photosynthesis	$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	350	张起信(1995) Duarte 等(2003)
T_{opt}	最适生长温度 Optimum temperature for growth	$^{\circ}\text{C}$	12	曾呈奎等(1962) 张为先等(1992)
T_{\max}	生长温度生态幅的上限 Upper temperature tolerance limit at which growth ceases	$^{\circ}\text{C}$	20	曾呈奎等(1962)
T_{\min}	生长温度生态幅的下限 Lower temperature tolerance limit at which growth ceases	$^{\circ}\text{C}$	0.5	曾呈奎等(1962)
S_{opt}	最适生长盐度 Optimum salinity for growth	无 None	30	陈根禄等(1958) 季仲强(2011)
S_{\max}	停止生长的盐度耐受的最大值 Upper salinity tolerance limit at which growth ceases	无 None	40	季仲强(2011)
S_{\min}	停止生长的盐度耐受的最小值 Lower salinity tolerance limit at which growth ceases	无 None	3	季仲强(2011)
$R_{\max 20^{\circ}\text{C}}$	20 $^{\circ}\text{C}$ 最大呼吸速率 Maximum respiration rate at 20 $^{\circ}\text{C}$	d^{-1}	0.015	EPA(1985)
N_{imin}	体内游离 N 最低需求 Minimum internal quota (subsistence quota) for nitrogen	$\mu\text{mol N}\cdot\text{gdw}^{-1}$	300	模型率定; EPA(1985)
N_{imax}	维持最大生长率所需的体内游离 N 含量 Internal quota of free nitrogen for maximum growth	$\mu\text{mol N}\cdot\text{gdw}^{-1}$	1714	Mizuta 等(1992)
k_{q}	无机 N 的半饱和和同化常数 Nitrogen half-saturation constant for growth	$\mu\text{mol N}\cdot\text{gdw}^{-1}$	250	EPA(1985)
$V_{\max\text{NO}_3}$	$\text{NO}_3\text{-N}$ 最大吸收速率 Maximum nitrate uptake rate	$\mu\text{mol NO}_3\cdot\text{gdw}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$	246.72	沈淑芬(2013)
$V_{\max\text{NH}_4}$	$\text{NH}_4\text{-N}$ 最大吸收速率 Maximum ammonium uptake rate	$\mu\text{mol NH}_4\cdot\text{gdw}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$	1263	沈淑芬(2013)
K_{NO_3}	$\text{NO}_3\text{-N}$ 半饱和吸收常数 Half-saturation constant for uptake of nitrate	$\mu\text{mol NO}_3\cdot\text{L}^{-1}$	29	沈淑芬(2013)
K_{NH_4}	$\text{NH}_4\text{-N}$ 半饱和吸收常数 Half-saturation constant for uptake of ammonium	$\mu\text{mol NH}_4\cdot\text{L}^{-1}$	169.49	沈淑芬(2013)
P_{imax}	维持最大生长率所需的体内游离 P 含量 Internal quota of free phosphorus for maximum growth	$\mu\text{mol PO}_4\cdot\text{gdw}^{-1}$	171	Mizuta 等(2003)
P_{imin}	体内游离 P 最低需求 Minimum internal quota(subsistence quota) for phosphorus	$\mu\text{mol PO}_4\cdot\text{gdw}^{-1}$	30	Mizuta 等(2003)
$V_{\max\text{PO}_4}$	$\text{PO}_4\text{-P}$ 最大吸收速率 Maximum phosphorus uptake rate	$\mu\text{mol PO}_4\cdot\text{gdw}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$	205.92	沈淑芬(2013)
K_{PO_4}	$\text{PO}_4\text{-P}$ 的半饱和吸收常数 Half-saturation constant for uptake of phosphorus	$\mu\text{mol PO}_4\cdot\text{L}^{-1}$	6.01	沈淑芬(2013)
E_{\max}	海带最大腐烂率 Maximum erosion rate of kelp	d^{-1}	0.006	Li 等(2007)
Z	海带养殖深度 Depth for kelp culture	m	0.5	模型率定

2 结果与分析

2.1 环境实测值

图 4 为桑沟湾高、中、低区 2016 年 11 月到 2017 年 6 月的环境实测值, 包括温度、盐度、TPM、营养

盐(氨氮 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、硝酸盐 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、磷酸盐 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)。在海带养殖期内, 低区的温度略高于中、高区。高区的营养盐较中、低区含量丰富, 另一方面高区在桑沟湾养殖区外侧, 流速较大, 水体中颗粒物浓度也较其他区域高。

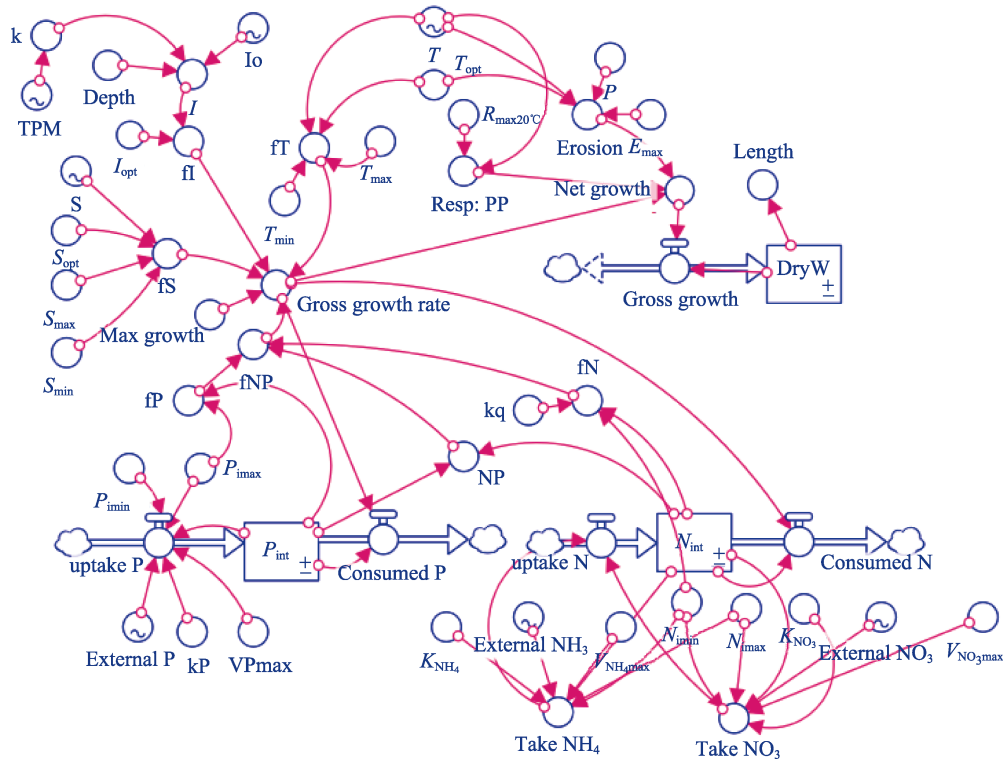


图 3 基于 Stella 软件构建的海带生长模型流程

Fig.3 Flow chart of kelp growth model based on Stella software

养殖区域温度是养殖生物必须考虑的关键环境因素。不同藻类均有其最适宜生长温度，温度高于或低于养殖生物最适宜生长温度，都有可能造成胁迫，引起细胞膜结构破坏，抑制养殖生物生长，从而造成个体损伤甚至死亡(Sies *et al*, 1993)。图 5 是模型温度强制函数的输出曲线。海带最适宜生长温度为 12℃，海带苗刚下海时海水温度为 15℃左右，超过了海带的最适宜生长温度，随着天气逐渐转冷，达到了海带适宜生长温度，3 月开始温度逐步升高，5 月中旬左右达到 12℃，随后温度开始持续攀升，对海带生长的限制作用加强，直到 6 月中旬左右食品海带收获结束。

养殖区域的营养盐对于海带的生长起着至关重要的作用，营养盐偏低在一定程度上限制了养殖容量，大面积的养殖生物及养殖筏架影响了养殖区域的水交换，使外部的营养盐难以进入湾内，成为限制水体生产力的关键因素。水体中 P 含量较少，海带生长内部所需的 P 也很少，氮磷比符合海带生长的条件，根据图 5 所示， $f(P)$ 的值稳定在 0.8~0.9， $f(N)$ 的值稳定在 0.54~0.75，图 7 所示 $f(NP)$ 的值稳定在 0.54~1。尽管水体中的 N、P 浓度很低，但是沉积物不断提供的 N、P 仍然可以满足海带生长的需要，削弱了水体中 N、P 含量低对海带的限制作用。

桑沟湾太阳辐射冬季辐射最低，春季不断攀升，夏季达到最大值，秋季随之下降。太阳辐射通过养殖

水体又经过光的反射、散射损失大部分光能，海带可利用的光能大幅度减少，可见光(400 nm~750 nm)的总能量衰减了 58%，只有 42%光照总能量可被海带所利用进行光合作用(Ferreira *et al*, 1989)。适宜的流速也使海带大部分时间均处于漂浮状态，以利于提高海带的受光面积，提高海带的产量。

桑沟湾盐度四季保持在 32 左右，接近海带生长最适宜盐度 30，对海带生长限制较小，盐度强制函数 $f(S)$ 保持在 0.91~0.96 常数。鉴于盐度在桑沟湾海带生长过程中起的限制作用较小，在模型构建上也可忽略盐度这一环境因素对海带生长的影响，而对于一年中盐度变化较大的海域，例如，南方降水量大，盐度变化明显，或是盐度对于养殖生物影响较大的物种进行模型构建时，盐度则是不可或缺的关键环境因素。

2.2 海带生长模拟值与实测值

高、中、低区海带长度和干重的实测值与模拟值情况如图 8、图 10 所示。从模拟生长曲线与海带实测值的比较情况来看，模型可以较好地模拟出海带在不同环境下的长度生长。高、中、低区海带的长度和干重模拟值大部分在实测值的标准误差范围内，能够较好地模拟不同区域海带的一般生长状况。图 9 和图 11 利用同一时期长度、干重的实测值与模拟值画出散点图，与 $y=x$ 线性公式拟合，得出 R^2 分别为 0.936、0.963。

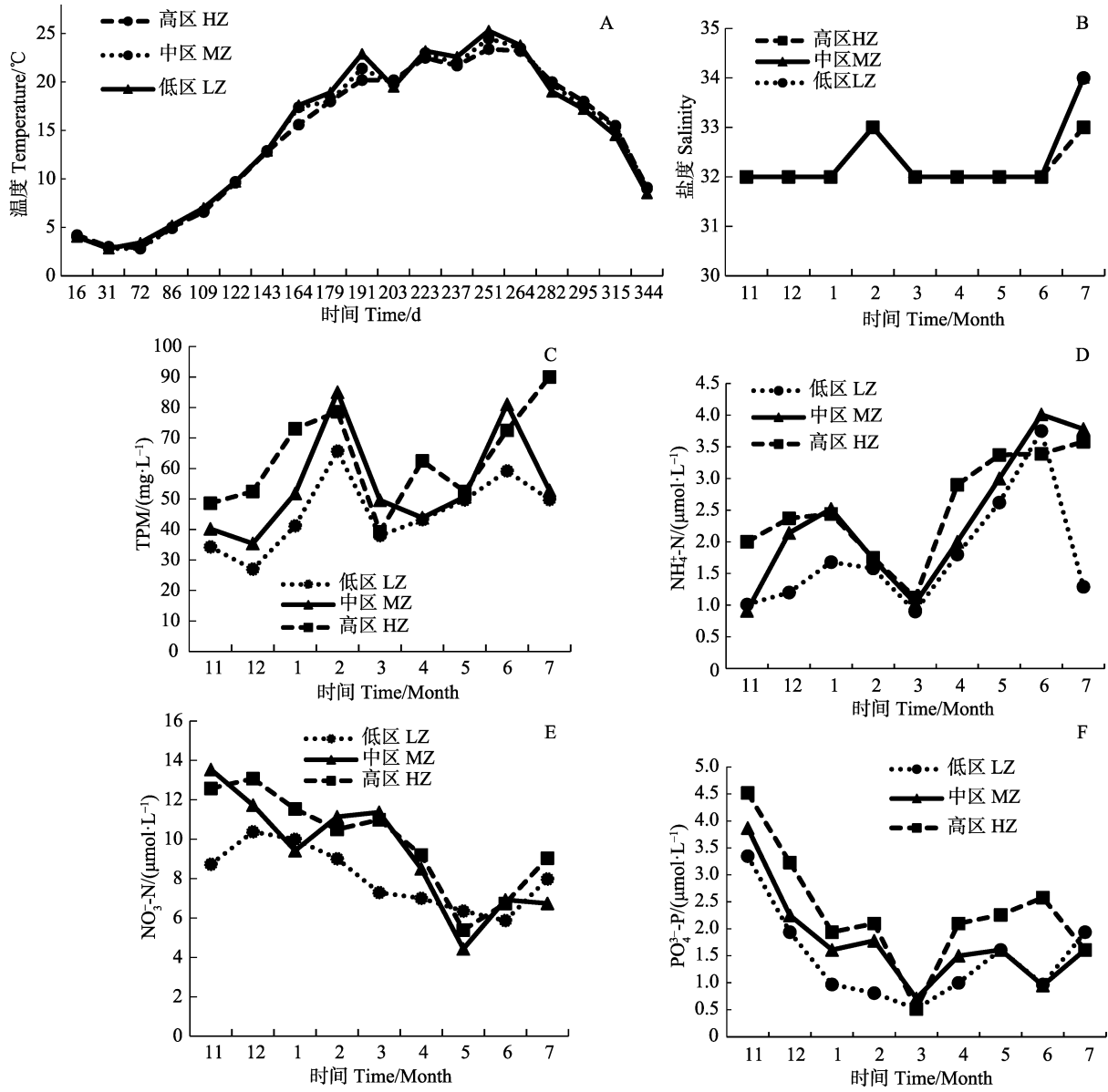


图 4 桑沟湾高、中、低区 2016~2017 年环境测量值
 Fig.4 Time-series environmental variables in HZ, MZ, LZ of Sanggou Bay 2016~2017

A: 温度, B: 盐度, C: TPM, D: $\text{NH}_4^+\text{-N}$, E: $\text{NO}_3^-\text{-N}$, F: $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$
 A: Temperature, B: Salinity, C: TPM, D: $\text{NH}_4^+\text{-N}$, E: $\text{NO}_3^-\text{-N}$, F: $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$

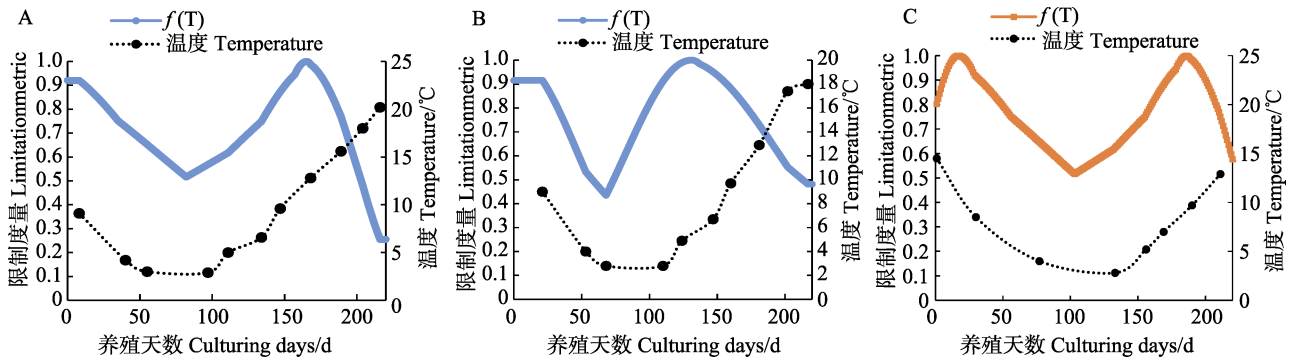


图 5 温度强制函数变化曲线 $f(T)$ 高区(A)、中区(B)、低区(C)
 Fig.5 Temperature forcing function curve $f(T)$ HZ(A), MZ(B) and LZ(C)

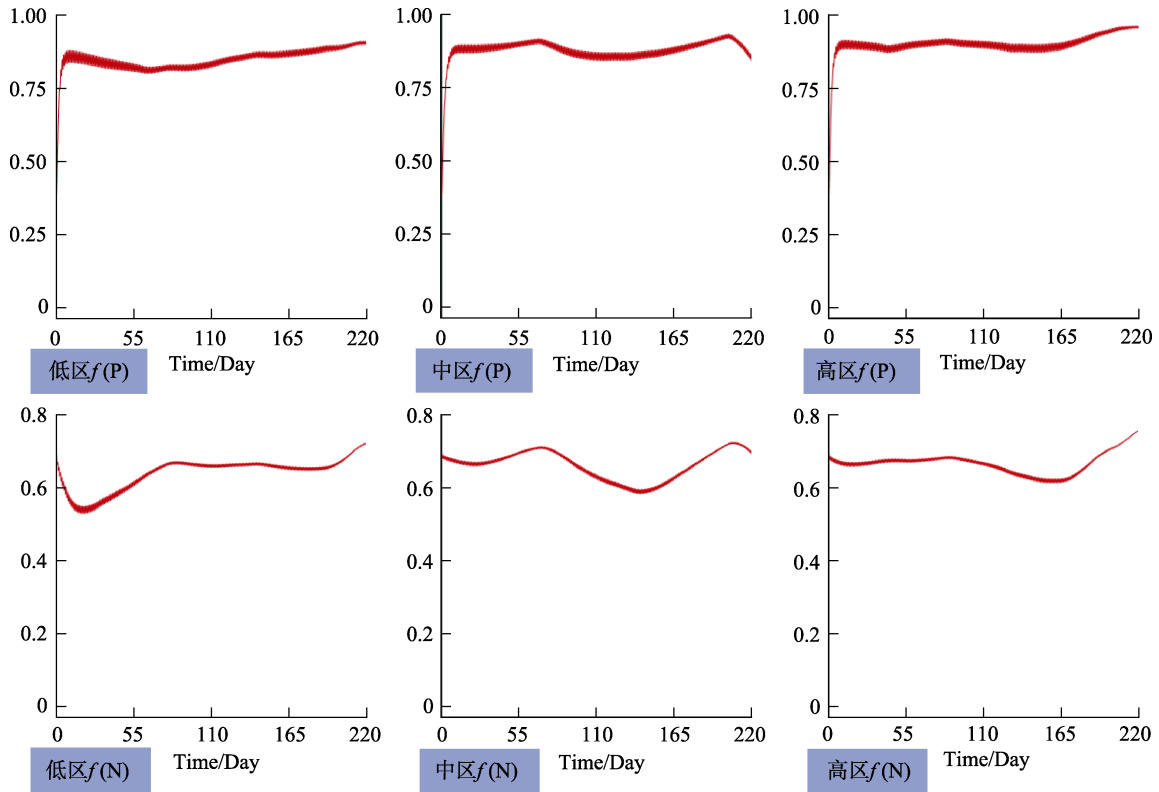


图6 磷强制函数变化曲线 $f(P)$ 及氮强制函数变化曲线 $f(N)$
 Fig.6 P forcing function curve and N forcing function curve

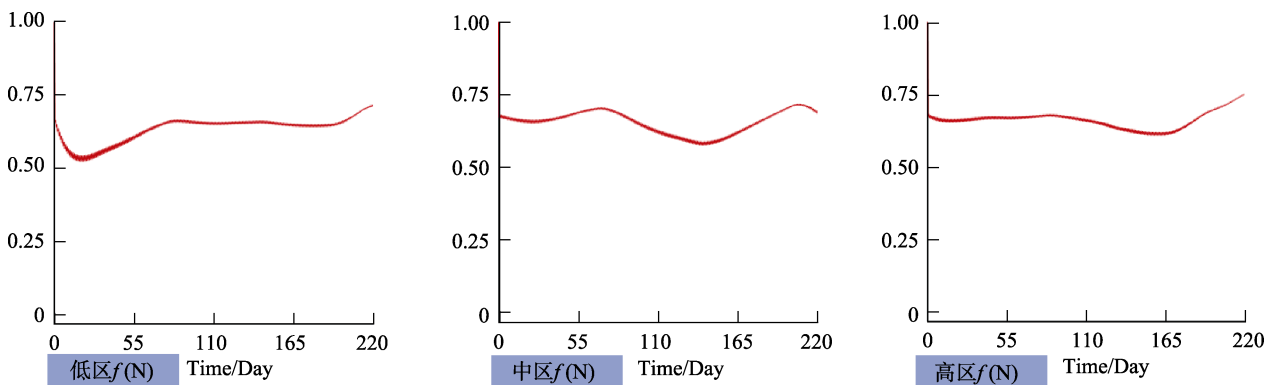


图7 N、P强制函数变化曲线 $f(NP)$
 Fig.7 N and P forcing function change curve

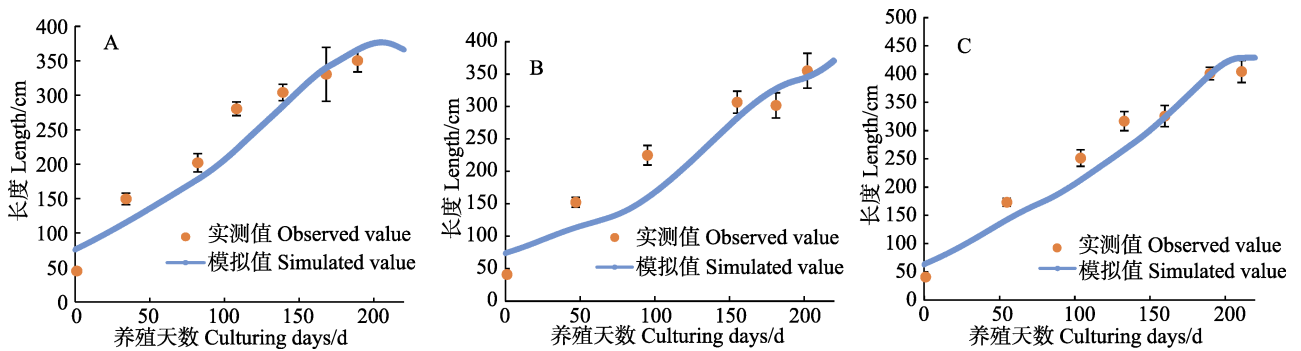


图8 高区(A), 中区(B), 低区(C)海带长度模拟值与实测值
 Fig.8 Comparison of simulated and observed kelp length growth of HZ(A), MZ(B) and LZ(C)

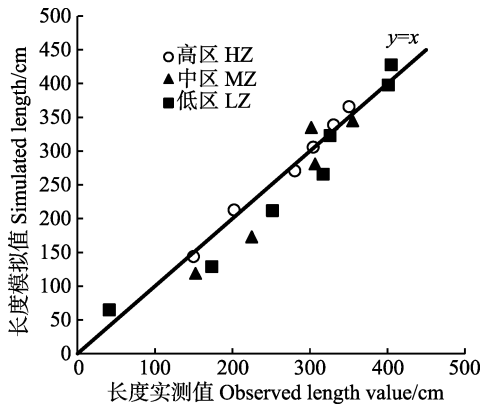


图 9 海带干重模拟值与实测值间的线性回归(y=x)
Fig.9 Linear regression (y=x) of simulated with observed values of length of kelp

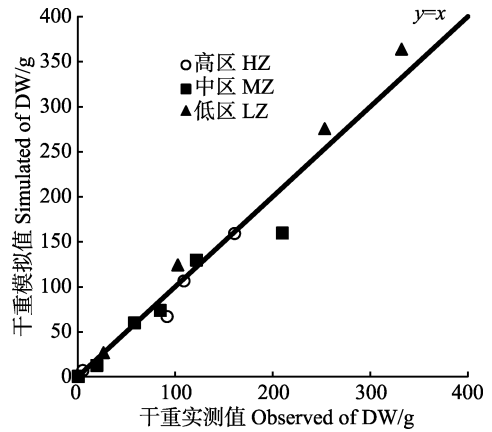


图 11 海带干重模拟值与实测值间的线性回归(y=x)
Fig.11 Linear regression (y=x) of simulated with observed values of dry weight of kelp

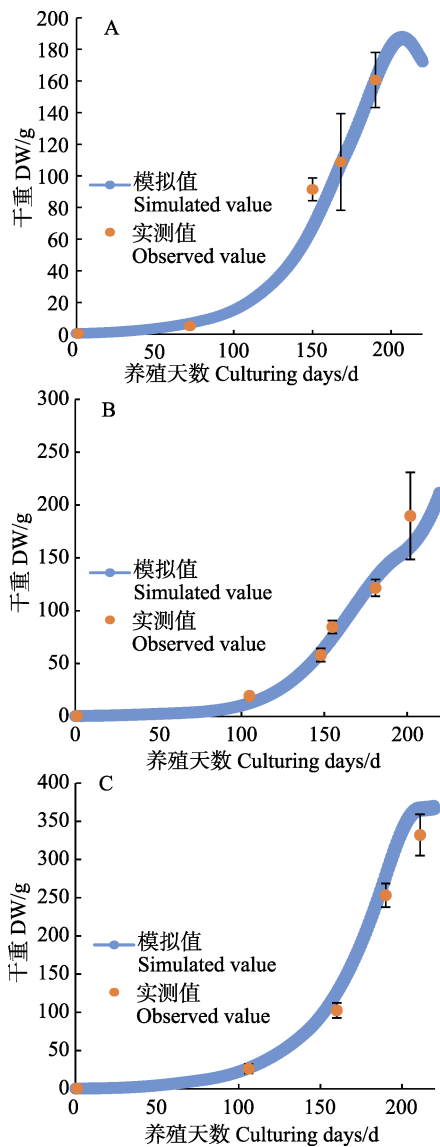


图 10 高区(A)、中区(B)、低区(C) 海带干重模拟值与实测值
Fig.10 The simulated values and observed kelp dry weight values of HZ(A), MZ(B) and LZ(C)

3 讨论

本研究选取了在水深、温度、光照、流速和营养盐等方面都有较显著差异的高、中、低区 3 个采样点, 作为海带生长模型的预测对象, 目的是更加准确地模拟环境因子变化对海带个体生长的影响, 进一步验证模型的准确性。以往的藻类生长模型并未考虑同一海域中不同区域的环境差异, 因此具有一定的局限性。根据高、中、低区海带生长环境参数以及海带干重、长度的测量结果, 我们发现低区比中区的海带生长情况好, 高区次之。本研究野外调查发现, 高区流速较大, 海流的波动对水体和海床扰动使海水浑浊, 降低了海带表面的光照强度; 低区风浪较小, 水体透明度高, 海带受到海水的扰动较少且接收到的光辐照能量较多, 有利于干物质的积累。其次, 海流较大会使海带边缘较脆嫩的部分发生断折, 加速海带叶片的腐烂。此外, 不同的养殖区放苗期、收获期不同, 高区收获期最晚, 此时海水温度较高, 可能影响了海带的生长。

海带的叶片腐烂是其特有的重要生理过程, 贯穿于整个孢子体生长期, 但不同时期的腐烂程度不同 (Li *et al*, 2007)。吴荣军等(2009)的海带生长模型未加入腐烂作用影响, 因此, 不能很好地反映海带生理过程; Zhang 等(2016)对于海带生长模型的研究中虽然考虑了海带腐烂, 但只设置了固定的腐烂数值, 未考虑环境变化对腐烂的影响, 模拟结果不够客观。本研究将海带腐烂作用公式化, 建立了海带腐烂与温度的关系, 完善了海带腐烂的消耗过程模拟。因此, 本研究的模型更加合理。模型在光照强制函数构建过程中, 考虑了桑沟湾养殖区全年的晴日天、阴雨天以及日照时长的影响, 使光照更为接近桑沟湾的实际情况, 这也是其他藻类模型所忽略的一项。

本研究建立的海带个体模型可以较好地模拟海带在不同环境条件下的生长状况。其中部分模拟值在生长后期略低于实测值,推测是海带在生长后期藻体叶片较为宽大,产生光照自遮蔽效应。与此同时,模型中未加入流速对于海带个体生长过程的影响,有可能影响了模型的准确性。张定民等(1986)发现,流速0.01~0.83 m/s为海带生存范围,而实测桑沟湾海区的流速为0.1~0.5 m/s,应不会对本研究中海带个体生存造成影响。但是流速对海带长度、干重等具体生长情况的影响迄今未见报道。为了改进和完善个体生长模型,尚需对流速作用于海带生长过程的机理做进一步研究。

模型中的参数主要根据文献中的数据进行校正,部分文献中参数研究区域不在桑沟湾,由于环境条件存在一定差异,有可能会造成部分模拟值与实测值的偏差。我们认为,模型的建立要综合考虑环境因素并结合模拟物种生物学特征以确定相关参数,从而更好地发挥模型的预测作用。

目前,本研究中建立的海带个体生长模型可作为子模型整合到模拟桑沟湾水产养殖生态系统的综合模型中,为实现基于桑沟湾生态系统的空间规划管理提供技术支持。

参 考 文 献

- Chen GL, Wang DS. Experience in pilot production management of kelp farming. *China Fisheries*, 1958(4): 10 [陈根禄, 王东室. 海带养殖试点生产管理中的几点体会. *中国水产*, 1958(4): 10]
- Duarte P, Meneses R, Hawkins AJS, *et al.* Mathematical modelling to assess the carrying capacity for multi-species culture within coastal waters. *Ecological Modelling*, 2003, 168(1): 109–143
- EPA (Environmental Protection Agency, USA). Rates, constants, and kinetics formulations in surface water quality modeling. *Research*, 1985: 455
- Ferreira JG, Ramos L. A model for the estimation of annual production rates of macrophyte algae. *Aquatic Botany* 1989, 33(1): 53–70
- Ji ZQ. Study on nearshore ecological remediation of nitrogen and phosphorous pollution and bioenergy extraction from macroalgae. Master's Thesis of Zhejiang University, 2011, 71–73 [季仲强. 近岸海域氮磷污染生态修复与大型海藻生物能源提取研究. 浙江大学硕士研究生学位论文, 2011, 71–73]
- Li JY, Murauchi Y, Ichinomiya M, *et al.* Seasonal changes in photosynthesis and nutrient uptake in *Laminaria japonica* (Laminariaceae: Phaeophyta). *Aquaculture Science*, 2007, 55: 587–597
- Liu JW, Hong CL, Liu HP, *et al.* Regional differences of large algal nutrient elements and their potential models for the restoration of ecological environment. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(8): 264–268 [刘嘉伟, 洪春来, 刘会萍, 等. 大型海藻营养元素的区域性差异及其修复生态环境的潜在模式. *江苏农业科学*, 2017, 45(8): 264–268]
- Marianne Alunno-Bruscia, van Der Veer HW, Kooijman SALM. The Aquadeb project (phase i): Analysing the physiological flexibility of aquatic species and connecting physiological diversity to ecological and evolutionary processes by using dynamic energy budgets. *Journal of Sea Research*, 2009, 62(2–3): 43–48
- Martins I, Marques JC. A model for the growth of opportunistic macroalgae (*Enteromorpha* sp.) in tidal estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2002, 55(2): 247–257
- Mizuta H, Maita Y, Yanada M. Seasonal changes of nitrogen metabolism in the sporophyte of *Laminaria japonica* (Phaeophyceae). *Nippon Suisan Gakkaishi*, 1994, 58: 2345–2350
- Mizuta H, Ogawa S, Yasui H. Phosphorus requirement of the sporophyte of *Laminaria japonica* (Phaeophyceae). *Aquatic Botany*, 2003, 76(2): 117–126
- Parsons TR, Takahashi M, Hargrave B. *Biological Oceanographic Processes*. Oxford, 1973, 186pp
- Radach G, and Moll A. Estimation of the variability of production by simulating annual cycles of phytoplankton in the central North Sea. *Progress in Oceanography*. 1993, 31(4): 339–419
- Jørgensen SE, *et al.* *Ecological model foundation*. Beijing: Higher Education Press, 2008: 158–165 [扬戈逊等. 生态模型基础. 北京: 高等教育出版社, 2008: 158–165]
- Shen SF. Bioremediation of *Laminaria japonica* and the establishment of its Gametophyte Clones. Master's Thesis of Fujian Normal University, 2013, 25–29 [沈淑芬. 海带的生物修复作用及无性繁殖系的建立. 福建师范大学硕士研究生学位论文, 2013, 25–29]
- Sies H. Strategies of antioxidant defense. *European Journal of Biochemistry*, 1993, 215(2): 213–219
- Solidoro C, Pecenic G, Pastres R, *et al.* Modelling macroalgae (*Ulva rigida*) in the Venice lagoon: Model structure identification and first parameters estimation. *Ecological Modelling*, 1997, 94(2–3): 191–206
- Steele JH. Environmental control of photosynthesis in the sea. *Limnology and Oceanography*, 1962, 7(2): 137–150
- Suzuki S, Furuya K, Kawai T, *et al.* Effect of seawater temperature on the productivity of *Laminaria japonica* in the Uwa Sea, southern Japan. *Journal of Applied Phycology*, 2008, 20(5): 833–844
- Wang H, Li LY. The development of algae growth model based on hydrodynamics in small and medium-sized reservoir and the simulation studies on the on the algae blooms. *Energy Environmental Protection*, 2012, 26(1): 21–25 [汪浩, 李玲燕. 基于水动力学的中小水库藻类生长模型及蓝藻暴发的模拟. *能源环境保护*, 2012, 26(1): 21–25]
- Wang WL. Determination of ammonia nitrogen in water by nessler's reagent colorimetric method. *Environmental Monitoring in China*, 2009, 25(1): 29–32 [王文雷. 纳氏试剂比色法测定水体中氨氮影响因素的探讨. *中国环境监测*, 2009, 25(1): 29–32]
- Wu RJ, Zhang XL, Zhu MY, *et al.* A model for the growth of Haidai (*Laminaria Japonica*) in aquaculture. *Marine*

- Science Bulletin, 2009, 28(2): 34–40 [吴荣军, 张学雷, 朱明远, 等. 养殖海带的生长模型研究. 海洋通报, 2009, 28(2): 34–40]
- Yao HQ. Biological characteristics of a new *Saccharina* “Haitian No. 1”. Master’s Thesis of Shanghai Ocean University, 2016, 11–15 [姚海芹. “海天1号”海带新品系生物学特征的研究. 上海海洋大学硕士研究生学位论文, 2016, 11–15]
- Zeng CK, Wu CY, Ren GZ. The influence of temperature on the growth and development of the Haidai (*Laminaria Japonica*) gametophytes. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1962, 4(1): 22–28 [曾呈奎, 吴超元, 任国忠. 温度对海带配子体的生长发育的影响. 海洋与湖沼, 1962, 4(1): 22–28]
- Zhang DM, Liao GR, Yang QM. Research on the relationship between the coastal current and *Laminaria japonica* raising II: an experiment of comparison between the current speed and *Laminaria japonica* growth. *Journal of Shandong College of Oceanology Natural science*, 1982(3): 73–79 [张定民, 缪国荣, 杨清明. 沿岸流与海带养殖关系的研究II: 流速对海带生长的影响. 山东海洋学院学报(自然科学版), 1982(3): 73–79]
- Zhang JH, Wu W, Ren JS, et al. A model for the growth of mariculture kelp *Saccharina japonica* in Sanggou Bay, China. *Aquaculture Environment Interactions*, 2016, 8: 273–283
- Zhang QX. Relationship between kelp growth and light. *China Fisheries*, 1994(6): 34–35 [张起信. 海带生长与光照的关系. 中国水产, 1994(6): 34–35]
- Zhang WX. Sanggou Bay mariculture. Beijing: Ocean Press. 1992: 59–68 [张为先. 桑沟湾增养殖. 北京: 海洋出版社. 1992: 59–68]

(编辑 江润林)

Model Simulated Growth of Kelp *Saccharina japonica* in Sanggou Bay

CAI Biying^{1,2,3}, ZHU Changbo⁴, LIU Hui^{2,3①}, CHANG Lirong⁵, XIAO Luyang⁵, SUN Qianwen^{1,2,3}, LIN Fan^{2,3}

(1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306; 2. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071; 3. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071; 4. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300; 5. Weihai Changqing Ocean Science & Technology Co., Ltd, Rongcheng 264316)

Abstract *Saccharina japonica* is a major economically important brown macroalgae. It is an important primary producer in the marine ecosystem and is also cultured under long-line in coastal northern China. The aim of this work was to develop an individual growth model capable of simulating the growth of the large-scale raft-cultured kelp in the north of China. The model can provide data support, to some extent, to northern kelp farming. The key processes for kelp growth and its relationship with environmental parameters were analyzed, using the Sanggou Bay aquaculture zone as the study area. We used the visualization model software STELLA, which simulated and predicted the growth of the length and dry weight of kelp. The individual growth model basic framework was $N_{\text{growth}} = G_{\text{growth}} - \text{resp} - E_{\text{kelp}}$, where, net growth was defined as gross growth minus respiration and erosion consumption. The gross growth of kelp was defined as a function of light, temperature, salinity, and internal nutrient (N and P) content in kelp, whereas the light parameters were obtained from the Sanggou Bay meteorological records, and salinity, temperature, and nutrient (N and P) measurements were observed at the site in Sanggou Bay. According to the model simulated results, model predictions are well within the observed results. The individual growth model simulated the length results and measured values of the kelp, with the fitting degree R^2 in the high, medium, and low zones as 0.936, whereas dry weight simulated results and measured values of the kelp had fitting degree R^2 in the high, medium, and low zones as 0.963. According to the results, the model can accurately reflect the true growth process of kelp. A reliable individual growth model is the basis for the assessment of aquaculture carrying capacity. In addition, the individual growth model may provide a scientific foundation for aquaculture spatial planning and management.

Key words Sanggou Bay; Kelp; Individual growth model; Environmental conditions; STELLA

① Corresponding author: LIU Hui, E-mail: liuhui@ysfri.ac.cn